Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 12, No. 4, 2022, p. 587-599

Investigating the Interaction between Soil and Cultivator Blade by Numerical Simulation and Validation of Results by Soil Bin Tests

H. Mahboub Yangeje[1], A. Mardani Korani[2*]

1- PhD Student, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
(*- Corresponding Author Email: a.mardani@urmia.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2021.70572.1041

Received: 25-05-2021 Revised: 28-08-2021 Accepted: 22-09-2021 Available Online: 25-09-2021	**How to cite this article:** Mahboub Yangeje, H., & Mardani Korani, A. (2022). Investigating the Interaction between Soil and Cultivator Blade by Numerical Simulation and Validation of Results by Soil Bin Tests. *Journal of Agricultural Machinery, 12*(4), 587-599. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2021.70572.1041

Introduction

Seedbed preparation, seeding, and transplanting are usually based on mechanical soil tillage. Tillage by cutting, mixing, overturning, and loosening the soil can modify the physical, mechanical, and biological properties of soil. These days, because of soil protection, the use of tillage tools is less and less recommended, and some implements such as cultivators are preferred to primary tillage tools such as plows.

Experimental study of soil-tool interaction and field measurements of the mechanics of tillage tools are usually time-consuming and costly. On the other hand, the variety of variables and uncontrolled conditions add other dimensions to the complexity of this method. Also, the experimental and analytical methods do not have a comprehensive view of stress distribution and soil deformation in the soil-tool interaction process.

Materials and Methods

The main purpose of this study is to validate the results of numerical simulations in two phases of experimental tests: in soil bin environment and in finite element computer simulations. Experimental tests were performed in the soil bin environment of the Department of Mechanical Engineering of Biosystems, Urmia University, which has a soil bin facility with dimensions of length and width of 24 and 2 m, respectively, and has clay loam soil.

Before experimental tests, soil preparation was performed by using some special tillage implements (harrow, leveler, and roller) which were attached to the soil bin (Figure.1).

For experimental tests, a mechanism set consisting of two cultivator blades with a width of 15cm, a length of 20cm, and at a spacing of 35cm from each other was prepared and constructed. The relevant mechanism is designed to have the ability to change the tillage depth. Data were collected at three different soil depth levels of 6, 10, and 14cm in the soil bin with three replications. Data recording was performed using a 10-channel data logger with load cell connectivity and data storage ability.

Also, in this study, the Drucker-Prager model as a finite element simulation method was used to calculate the stress during the soil-tool relationship. ABAQUS 6.10.1 software was used to simulate the cultivator tine. To solve the problem, the soil parameters were defined as presented in Table 1, and then the interaction between the soil-tool model and the necessary constraints, including boundary conditions, were defined. In the next step, meshing was applied to the constructed model.

Results and Discussion

In the results section, first, the results related to the amount of traction force required for the tillage tine in the simulation were calculated and then compared with the soil bin experimental tests. The traction force of the finite element simulation results for three tillage depths of 6, 10, and 14 cm in three principal directions is shown in Figure 4. A comparison of simulation and experimental results showed that there is a good agreement between them. In comparison, the simulation error range of the three depths of 6, 10, and 14 cm has shown 7.3, 5.6, and 4.16% at a speed of 2.5 kmh^{-1}, respectively, as the velocity studied in this research.

In the next section, the results of stress distribution contours in the soil and finally the overlap of the blade effect were discussed. Figure 6 shows the status of stress contours at three depths. By increasing the depth of the tine at the three depth levels studied, the stress range is shifted from the soil surface to its depth. For this

purpose, at the maximum depth studied in this study (14 cm), it shows that the stress propagation to the soil surface is less than at other depths. Also, with decreasing depth, for a depth of 6 cm, the maximum stress was on the top soil surface, in other words, more deformation was seen on the soil surface.

Conclusion

Comparing the simulation results for predicting traction force with the results of experimental tests has led to relatively acceptable results and the maximum traction force prediction error at different depths has been about 7.3%.

The distribution of stress in the soil was observed due to the tine depth. The highest intensity of stress propagation was observed at the soil surface; and the highest soil surface deformation at a depth of 6 cm. With increasing depth, both parameters of stress and soil surface deformation have decreased.

According to the results of the studied blades, it is better to use these types of tillage tools only at lower depths. Also, in evaluating the overlap of the soil loosening zone in the side-by-side tines, it proves the superiority of the tine performance at lower depths.

Keywords: Chisel plow, Finite element method (FEM), Soil bin, Soil- tine interaction

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۱۲، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۱، ص ۵۹۹-۵۸۷

بررسی برهم‌کنش خاک و تیغه پنجه‌غازی توسط شبیه‌سازی عددی و اعتبارسنجی نتایج با آزمون‌های انباره خاک

هوشنگ محبوب ینگجه[1]، عارف مردانی کرانی[2*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۳۱

چکیده

در این مطالعه به بررسی نیروی کششی تیغه پنجه‌غازی در دو بخش شبیه‌سازی به روش اجزای محدود با تحلیل اویلرین- لاگرانژی و آزمون‌های تجربی در محیط انباره خاک پرداخته شد. از دو تیغه با فاصله 35 cm و در سه عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متری با سرعت ۲/۵ کیلومتر بر ساعت استفاده شد. نیروی کششی تیغه طی شبیه‌سازی در عمق‌های ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر به‌ترتیب ۰/۶، ۲/۵ و ۳ کیلونیوتن بوده و نسبت به نتایج انباره خاک دارای محدوده خطای ۷/۳، ۵/۶ و ۴/۱۶ درصد بود. بیشترین تنش ایجاد شده در خاک در سه عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر به‌ترتیب در حدود ۲۰، ۶۸ و ۶۹ کیلوپاسکال بوده است. در عمق ۶ سانتی‌متر با توجه به نرم بودن خاک، نیروی عمودی وارده بر تیغه متاثر از وزن خاک بوده است. همچنین بررسی گسترش تنش در خاک حاکی از آن بوده است که با افزایش عمق کار، مقدار به‌هم‌خوردگی سطحی خاک و همچنین انتشار تنش به سطح خاک کاهش می‌یابد. علاوه بر چگونگی تغییرات تنش، هم‌پوشانی دو تیغه مجاور نیز با افزایش عمق کار ازنظر به‌هم‌خوردگی خاک، کمتر می‌شود. با توجه به افزایش نیروی کششی تیغه در عمق‌های بالاتر، عمق کار بیشتر از ۱۰ سانتی‌متر بر اساس نتایج مربوط به چگونگی توزیع تنش در خاک توصیه نمی‌شود. در همین رابطه، توان مصرفی هر تیغه در عمق کمتر از ۱۰ سانتی‌متر در حدود ۰/۴ کیلو وات بوده است درحالی که در عمق‌های بالا در حدود ۲ کیلو وات برای هر تیغه توان لازم است.

واژه‌های کلیدی: برهم‌کنش خاک-تیغه، خاک‌ورزی، روش المان محدود، کولتیواتور

مقدمه

خاک یکی از منابع طبیعی است که ساختار و عملکرد بسیار متغیر داشته و به‌طور پویا تحت بازسازی و یا تخریب قرار می‌گیرد (Várallyay, 2010). ازجمله تخریب‌های ایجادشده توسط روش‌های خاک‌ورزی مرسوم به دلیل جابه‌جایی زیاد و زیر و رو شدن خاک می‌توان به از بین رفتن کانال‌ها و مجاری ساخته‌شده توسط موجودات داخلی خاک اشاره نمود. این امر باعث کاهش نفوذپذیری آب و هوا به عمق زیر 15 cm خاک شده و درنهایت منجر به کاهش فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک گشته و تنفس ریشه گیاه را با مشکل مواجه می‌کند. برای به حداقل رساندن این تخریب‌ها از روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی استفاده می‌شود. پنجه‌غازی‌ها نیز یکی از ادوات کشاورزی مورداستفاده در کشاورزی حفاظتی هستند که ضمن شکستن لایه‌های خاک، از فرسایش بادی و آبی جلوگیری کرده و به نفوذ بهتر آب در بافت خاک کمک می‌کنند که نتیجه آن افزایش عملکرد محصول است (Shao *et al.*, 1993; Busari, Kukal, Kaur, Bhatt, & Dulazi, 2015). آماده کردن زمین زراعی مستلزم برش خاک، برگرداندن و خرد کردن خاک است. عملیات اولیه آماده کردن زمین زراعی توسط ادواتی مثل گاوآهن برگرداندار، گاوآهن بشقابی، گاوآهن چیزل و زیرشکن‌ها انجام می‌گیرد. از جمله وظایف مهم خاک‌ورزها حفظ کیفیت مطلوب خاک، باروری، کاهش اثرات زیان‌بار تراکم خاک، کنترل علف‌های هرز و تثبیت بقایای گیاهی در خاک و همچنین جلوگیری از تأثیر تغییرات آب و هوایی است. همچنین محققان زیادی بر این امر تأکید می‌کنند که اختلالات مکانیکی بر روی خاک می‌تواند منجر به از دست دادن مواد آلی خاک و ایجاد خسارت ازجمله بدتر شدن ظرفیت باربری و کارایی خاک شود (Birka´s, 2009; Smatana, Macák, & Demjanová, 2010).

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: a.mardani@urmia.ac.ir
https://doi.org/10.22067/jam.2021.70572.1041

از طرف دیگر علاوه بـر عملکـرد و کیفیـت فراینـد خـاک‌ورزی، نیروی کششی دنباله‌بندها و یا به عبارتی انرژی مصرفی در خاک‌ورزها نیـز از اهمیـت بـالایی برخـوردار اسـت. بـه لحـاظ مصـرف انـرژی، آماده‌سازی زمین زراعی همیشه برای محققان، طراحان، تولیدکنندگان و کشاورزان یک مسئله مهم بوده است. همچنین عملیات خـاک‌ورزی در حدود نیمی از انرژی مکانیکی مورداستفاده در تولید محصول را بـه خود اختصاص می‌دهـد (Kushwaha & Zhang, 1998). از ایـن‌رو، پیش‌بینی دقیق نیروهای اعمـالی بـر تیغـه خـاک‌ورز و بهینـه‌سـازی طراحی ابزار خاک‌ورز، به بهبود بهره‌وری انرژی کمک خواهد کرد.

بررسی تجربی رابطه خاک-ابزار و اندازه‌گیری‌های تجربی معمولاً زمان‌بر و پرهزینه است و از این‌رو، معمولاً پس از انجـام آزمـایش‌هـا ابزار موردنظر تولید می‌گردد. در این شـرایط، ارزیـابی مخلـوط کـردن خاک و پیش‌بینـی نیروهـای وارده بـر خـاک‌ورزهـا، تنهـا بـه‌صـورت آزمایشی و با اندازه‌گیری‌های دشوار امکان‌پذیر است. بررسی تحلیلـی برهم‌کنش خاک و ابزار ممکن است با استفاده از روش‌های تحلیلـی-تجربی مانند معادله عمومی خاک‌بـرداری انجـام گـردد و از لحـاظ در برداشتن ثابت‌های زیاد و دشواری در تعیین پارامترهای موجود در این معادلات، چندان نمی‌توان به آن‌ها متکی بود (McKyes, 1985). در کنار پرهزینه بودن این روش‌ها، تنوع متغیرها و محیط پیچیده شـامل خاک و ابزار، ابعاد دیگری را به پیچیدگی این روش اضـافه مـی‌کنـد. همچنین مهم‌ترین قسمت ادوات خاک‌ورزی که با خاک درگیر بوده و عمل برش و نرم کردن خاک را انجـام مـی‌دهـد، تیغـه ادوات اسـت. پژوهشگران بر اساس فرم شکست خاک توسط تیغـه‌هـای خـاک‌ورز، آن‌ها را به دو گروه تیغه‌های باریک و تیغه‌های پهن تقسیم کـرده‌انـد (Gowdin & Spoor, 1977; Mckeys, 1985; Spoor & Godwin, 1978). یکی از روش‌های متداول که امروزه با پیشـرفت توانایی پردازش کامپیوترها در کنار روش‌های تجربی، رایج شده است شبیه‌سازی‌های عددی برهم‌کنش خاک-ابزار اسـت. روش تجربـی و تحلیلی، دیدگاه فراگیر و جامعی از توزیع تنش در تماس خاک و ابـزار درگیر با خاک و همچنین تغییـر شـکل‌هـا را نـدارد. بـر ایـن اسـاس، محققان از روش‌هایی چون المان محـدود بـرای شـبیه‌سـازی چنـین فرایندهای پیچیده‌ای در کنـار اعتبارسـنجی و ارزیـابی آن‌هـا توسـط آزمون‌های تجربی بهره جسته و در این راستا از نـرم‌افزارهـای المـان محدود و یا المان گسسته استفاده می‌کننـد (Kešner *et al.*, 2021; Liu, Liu, Ma, Ni, & Gu, 2021; Ucgul & Saunders, 2020; Azimi-Nejadian, Karparvarfard, Naderi-Boldaji, & Rahmanian-Koushkaki, 2019; Ibrahmi, Bentaher, Hamza, Maalej, & Mouazen, 2015).

روش‌هـای تحلیلـی در مطالعـه تعامـل خـاک-ابـزار تنهـا بـرای پیش‌بینی نیروی ابزار استفاده می‌شـود. بنـابراین روش‌هـای عـددی ازجمله روش المان محدود (FEM) و روش المان گسسـته (DEM) نیـز بـرای شـبیه‌سـازی تعامـل بـین خـاک و ابزارهـای خـاک‌ورزی استفاده‌شده است (Kešner *et al.*, 2021; Asaf, Rubinstein, & Shmulevich, 2007). مطابق گزارش‌های ارائه‌شـده، ایـن روش‌هـا نه‌تنها قادر به محاسبه نیروی ابزار، بلکه قابلیت شـبیه‌سـازی بـه هـم خوردگی خاک را نیز دارا هستند (Mouazen & Neményi, 1999; Kushwaha & Shen, 1995; Kešner *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2021; Ucgul & Saunders, 2020)

قابلیت روش المان گسسته برای مدل‌سازی بـرهم‌کـنش خـاک-ابزار در یک فرآیند خاک‌ورزی توسط شمولویچ و همکاران با اسـتفاده از شبیه‌سازی برهم‌کنش تیغه برشی پهن-خاک بررسـی‌شـده و چهـار شکل متفاوت تیغه انتخـاب گردیـد و همبسـتگی خـوبی بـین نتـایج شبیه‌سازی المان مجزا و نتایج آزمایشـگاهی بـرای منحنـی شکسـت به‌دست آمد (Shmulevich, Asaf, & Rubinstein, 2007).

هدف از این مطالعه، بررسی تجربی مقدار نیـروی کششـی مـورد نیاز تیغه‌های پنجه‌غازی در محـیط انبـاره خـاک و مقایسـه بـا نتـایج شبیه‌سازی اجزای محدود همین فرایند در نرم‌افـزار آبـاکوس[1] در سه عمق متفاوت است. بیشتر مطالعـات انجـام‌شـده ازایـن‌دسـت شـامل بررسی عملکرد یک تیغه اسـت کـه در مطالعـه حاضـر، آزمـون‌هـای تجربی و شبیه‌سـازی هـم‌زمـان دو تیغـه مجـاور بـه‌منظـور بررسـی هم‌پوشانی عرضی آن‌ها در نظر گرفته‌شده است.

مواد و روش‌ها

انباره خاک و آزمایش‌های تجربی

آزمون‌های تجربی ایـن پـژوهش، در محـیط انبـاره خـاک گـروه مکانیک بیوسیستم دانشگاه ارومیه با نوع بافت خاک رسی لومی انجام شد. انباره خاک یک محیط کنترل‌شده از خاک برای انجام تحقیقـاتی از این دست است که امکان شبیه‌سازی محیط واقعی خاک-ابزار را در اختیار محققان قرار می‌دهد. انباره خاک مورد استفاده دارای کانالی بـه ابعاد طول و عرض به‌ترتیب ۲۴ و ۲ متر و ارتفاع لایـه خـاک ۱ متـر است. همچنین دارای کشنده به توان ۳۰hp بـوده و امکـان فـرآوری خاک مورد آزمایش توسط دنباله‌بندهای ویـژه در آن پـیش‌بینـی‌شـده است (Mardani, Shahidi, & Karim-Maslak, 2010). عملیـات آماده‌سازی و همگن‌سازی خاک برای آزمایش‌هـا در شـرایط یکسـان انجام گرفت. برای نرم کردن خاک کانـال از یـک چنگـه مخصـوص آماده‌سازی که قابل اتصال به کشنده انباره خاک است، استفاده گردید. فرایند نرم کردن خاک به‌گونه‌ای بود کـه لایـه‌ای از خـاک تـا عمـق تقریبـی ۲۰ cm شـخم زده شـد و سـپس بـه‌خـوبی بـاهم مخلـوط می‌گردید. بعد از چنگه‌زنی، خاک نـرم شـده توسـط مالـه متصـل بـه کشنده انباره خـاک همـوار گردیـد (شـکل ۱). مشخصـات مکـانیکی

1- ABAQUS

مصالح تیغه و خاک انباره بـرای انجـام آزمـایش‌هـا در جـداول ۱ و ۲ ارائه‌شده است.



شکل ۱– مراحل فرآوری خاک انباره خاک برای انجام آزمایش‌ها
Fig. 1. Soil preparing steps for tests

جدول ۱– خصوصیات خاک انباره خاک برای تحلیل المان محدود
Table 1- Soil mechanical properties in soil bin for FEM analysis

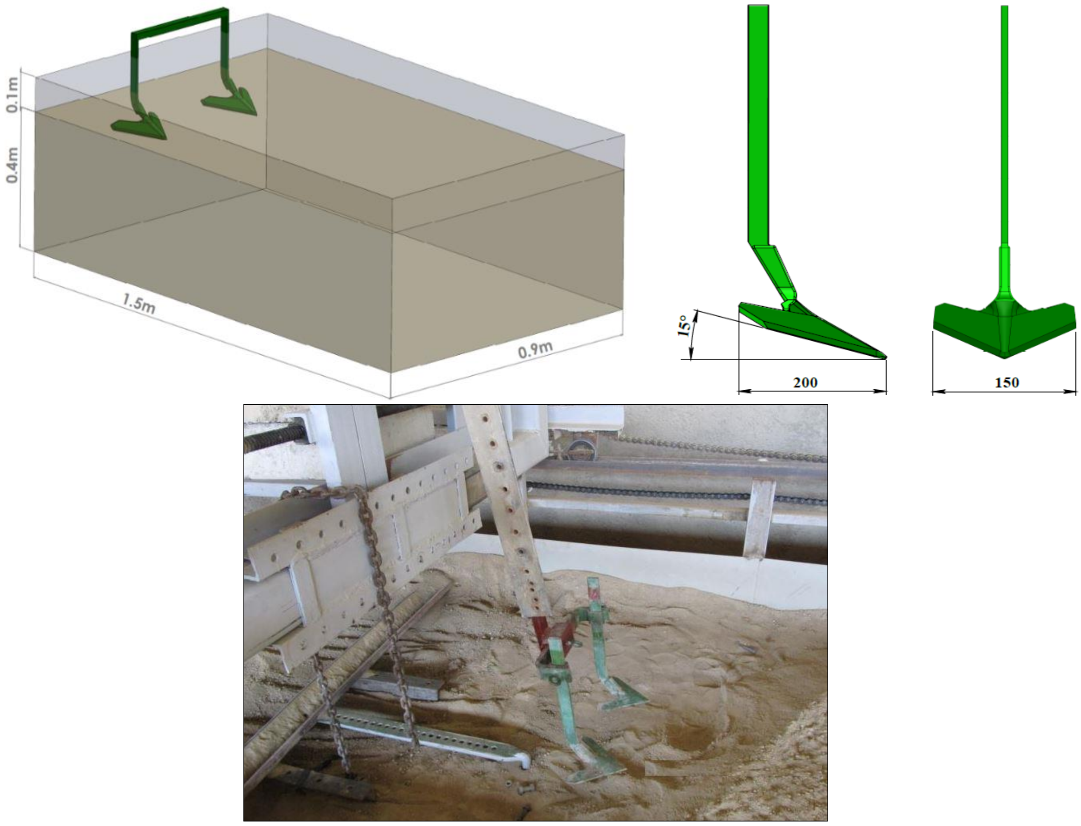
پارامتر خاک **Soil parameter**	واحد **Unit**	مقدار **Value**
شن Sand	%	43
سیلت Silt	%	22
رس Clay	%	35
مدول یانگ Young's modulus	(MPa)	0.04
ضریب پواسون Poisson's ratio	(--)	32
چگالی Density	(kgm^{-3})	1900
تنش تسلیم Yield stress	(MPa)	0.035
زاویه اصطکاک داخلی Friction angle of the material(ϕ)	(deg)	35
ضریب تنش جریان Flow stress coefficient (K)	(--)	.8
زاویه اتساع Dilatancy angle (ψ)	(deg)	1

جدول ۲- خواص مکانیکی تیغه شبیه‌سازی شده

Table 2- Mechanical Properties of simulated tine

پارامتر **Parameter**	واحد **Unit**	مقدار **Value**
مدول یانگ Young's modulus	(GPa)	205
تنش نهایی کششی Ultimate stress	(MPa)	520
ضریب پواسون Poisson ratio	-	0.29
وزن مخصوص Density	(kgm^{-3})	7870

برای انجام آزمایش‌ها، مجموعه‌ای شامل دو تیغه پنجه‌غازی با عرض ۱۵ میلی‌متر و طول ۲۰ میلی‌متر همراه با ساقه پنجه‌غازی به فاصله ۳۵ سانتی‌متر از همدیگر آماده شد که به همراه یک قاب با قابلت تنظیم تیغه‌ها و اتصال مجموعه به انباره خاک استفاده شد (شکل ۲). مکانیسم مربوطه به نحوی طراحی گردیده که قابلیت تغییر عمق را دارا باشد زیرا در آزمایش‌ها، پارامتر عمق یکی از پارامترهای مستقل است. پس از نهایی شدن طرح مکانیسم پنجه‌غازی، مدل سه‌بعدی آن نیز در نرم‌افزار SolidWorks2016 طراحی گردید. در شکل ۲ نمایی از پنجه‌غازی سوار شده بر روی کشنده انباره خاک و همچنین مدل کامپیوتری به‌صورت سه‌بعدی نمایش داده‌شده است.



شکل ۲- شکل و مدل سه‌بعدی پنجه‌غازی

Fig. 2. Figure and 3D model of the tine

مکانیسمی که برای نصب تیغه‌ها بر روی کشنده انباره خاک طراحی گردید، شامل اتصالاتی لولایی شکل است که علاوه بر قابلیت نصب بر روی کشنده انباره خاک، قابلیت نصب یک نیرو سنجش را نیز دارا است. در واقع، اتصالات به‌گونه‌ای می‌باشد که شاسی پنجه‌غازی یک درجه آزادی در راستای حرکت تیغه را دارد. درجه آزادی در نظر گرفته‌شده در راستای حرکت تیغه، توسط یک نیروسنجش s شکل محدودشده است که درنهایت، اندازه‌گیری و سنجش نیروی وارده به تیغه‌ها را میسر سازد. سیستم تحصیل داده شامل یک دیتالاگر است که با فرکانس ۵۰ هرتز، داده‌های مربوط به نیروی به‌وجود آمده در نیروسنج را در یک حافظه جانبی و همین‌طور در یک لپ‌تاپ ذخیره می‌کند. روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی در مناطق مختلف، متفاوت است که برحسب نوع خاک و گیاه و میزان بقایای محصول قبلی تا عمق کافی (۱۵–۸ سانتی‌متر) برای قرار دادن کود و بذر و مخلوط کردن بقایا با لایه سطحی انجام می‌گیرد(Sadeghnejad & Islami, 2006). بنابراین، داده‌برداری‌ها در این محدوده یعنی در سه عمق مختلف ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متری خاک در انباره خاک با سه تکرار انجام گرفت. ثبت داده‌ها با استفاده از یک دیتالاگر ۱۰ کاناله با قابلیت اتصال لودسل و ذخیره داده‌ها به انجام رسید. داده‌های سنجیده شده توسط لودسل بر روی حافظه جانبی توسط دیتالاگر ذخیره گردید. سپس داده‌ها به محیط اکسل کامپیوتر منتقل‌شد.

شبیه‌سازی

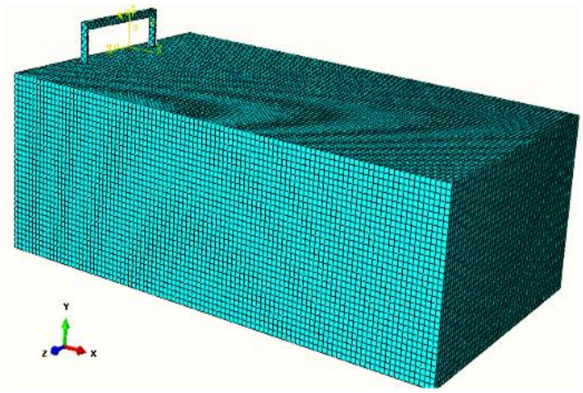
تغییر شکل خاک، به‌طور عمده هنگامی‌که به بیشتر از تنش عملکرد برسد به جریان پلاستیکی منجر می‌شود. بنابراین، استفاده از معیار عملکرد مناسب برای تجزیه‌وتحلیل رفتار پلاستیک خاک بسیار مهم است. در این تحقیق، از مدل دراکر- پراگر[1] برای محاسبه تنش رابطه خاک-ابزار استفاده شد. به‌منظور شبیه‌سازی، مدل طراحی‌شده پنجه‌غازی-خاک در نرم‌افزار سالیدورکس به محیط اباکوس فراخوانی شد. فرمول‌بندی و روش تحلیل مسئله و شبیه‌سازی عددی، با استفاده از بسته نرم‌افزار المان محدود ABAQUS 6.10.1 و با تحلیل‌های دینامیکی به انجام رسید. با استفاده از این بسته نرم‌افزار می‌توان تغییر شکل‌های بزرگ را با تحلیل اویلرین لاگرانژی[2] مدل کرد. در فرمول‌بندی این تحقیق، صفحه فشاردهنده لاگرانژی به‌صورت صلب و تغییر شکل ناپذیر در نظر گرفته‌شد و خاک هم در ناحیه اویلرین تعریف گردید. شبیه‌سازی به روش المان محدود از شرط تسلیم موهر-کلمب توسط شرط تسلیم دراکر- پراگر تقریب زده‌شده است. مدل‌های توسعه‌یافته دراکر- پراگر برای مدل کردن مواد اصطکاکی (مواد گرانوله مانند خاک) توسعه‌یافته‌اند. درنتیجه بر اساس مطالعات محققان و فرمول‌های پایه‌ای، مدل دراکر- پراگر برای هر دو رفتار حجمی و برشی استفاده می‌شود (Mouazen & Neményi, 1999).

مدل هندسی خاک- پنجه‌غازی (شکل ۲) طراحی و مونتاژ شده در نرم‌افزار سالیدورکس، شامل قسمت‌هایی چون خاک، ناحیه اویلری و تیغه پنجه‌غازی می‌باشد. پس از طراحی مدل، از آن توسط نرم‌افزار سالیدورک خروجی با پسوند (x.t) گرفته‌شده تا بتوان مدل طراحی‌شده را در نرم‌افزار آباکوس فراخوان کرد. ابعاد خاک به‌اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته‌شده است تا تأثیری در نتایج ازنظر شرایط مرزی نداشته باشد. در شکل ۱ ابعاد مدل خاک-ابزار به همراه ناحیه لاگرانژی و اویلری نشان داده‌شده است.

برای حل مسئله، ابتدا به تعریف پارامترهای خاک که در جدول ۱ ارائه شد، اقدام گردید و سپس برهمکنش بین مدل خاک-ابزار و قیدهای لازم ازجمله شرایط مرزی لحاظ شد. در این مطالعه، شرایط مرزی شامل سرعت حرکت تیغه در عمق‌های مختلف و تعریف دیواره‌های کانال بود که مطابق آزمایش‌های تجربی در نرم‌افزار تعریف شد. در مرحله بعد، شبکه‌بندی (مش‌بندی) برای مدل ساخته‌شده اعمال گردید، که طی فرایند تعیین مش بهینه برای تعیین میزان درشتی و ریز بودن، بر اساس شرایط مسئله و قدرت سیستم پردازش مدنظر قرار گرفت. در این مطالعه، برای صرفه‌جویی‌های زمانی در حل مسئله، در بخش مربوط به ایجاد شبکه مدل هندسی، برای شبیه‌سازی مدل از چهار سطح شبکه ۱۴۰۱۷۴، ۱۸۰۲۵۸، ۲۳۱۴۸۳ و ۴۸۹۱۵۳ برای آزمون استقلال شبکه بهره گرفته شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تفاوت بین نتایج نیرو در بین سطوح شبکه‌بندی سوم و چهارم (به‌ترتیب ۲۳۱۴۸۳ و ۴۸۹۱۵۳ المان) کم‌تر از ۳٪ بود. بنابراین، برای صرفه‌جویی‌های زمانی در حل، شبکه با تعداد ۲۳۱۴۸۳ المان به‌عنوان شبکه پایه در این مطالعه استفاده گردید. ناحیه اویلرین که خاک مدل شده در آن تطبیق داده می‌شود از المان‌های مکعبی شکل ۸ گرهی و در مدل پنجه‌غازی از المان‌های مثلثی استفاده‌شده است. طرح‌واره‌ای از شبکه‌بندی انجام‌شده مدل خاک-ابزار در نرم‌افزار آباکوس در شکل ۳ ارائه‌شده است.

طی مراحل پایانی که شامل حل مسئله و پردازش می‌باشد، نرم‌افزار، مسئله را طبق شرایط تعریف‌شده حل کرده و نتایج را به‌صورت کانتورهای رنگی و نمودارهایی که برای نتایج مسئله در نظر گرفته‌شده نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که برای شبیه‌سازی‌ها از یک رایانه با پردازشگر Intel core i5 و حافظه رم ۱۶ مگابایت استفاده گردید.

1- Prager-Drucker
2- Eulerian-Lagrangian

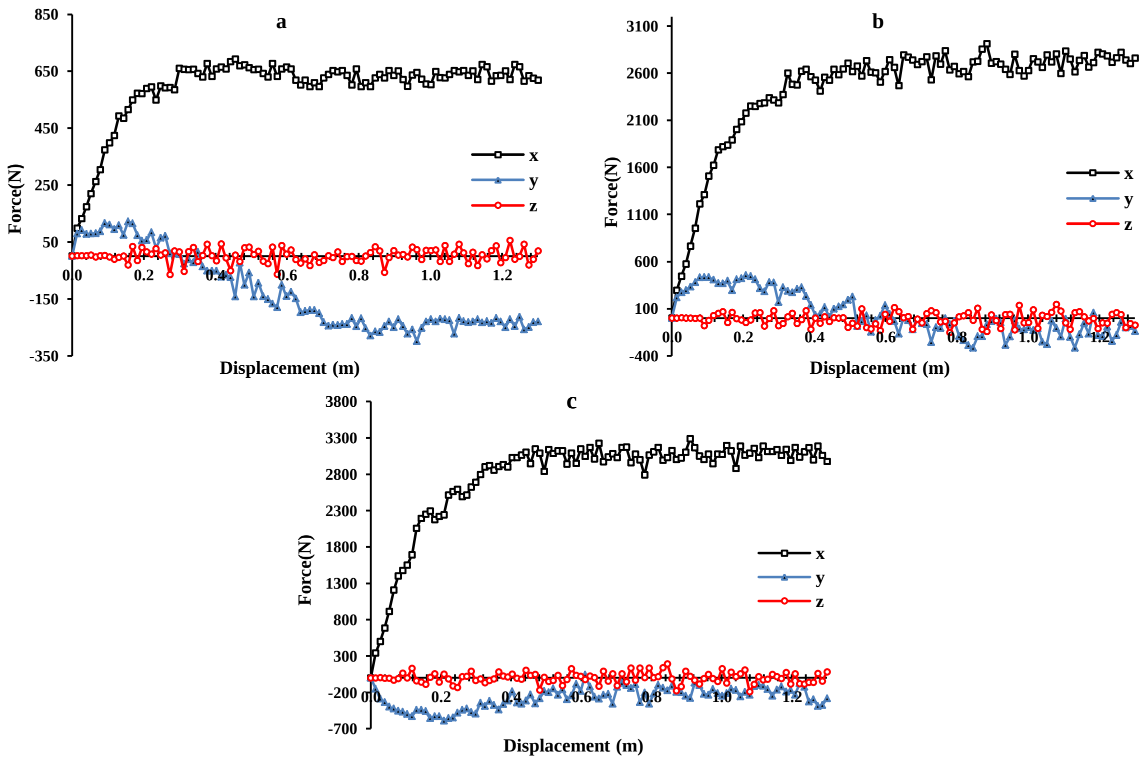


شکل ۳- شبکه‌بندی مدل خاک-پنجه‌غازی در نرم‌افزار آباکوس

Fig. 3. Meshing of soil- tine in ABAQUS software

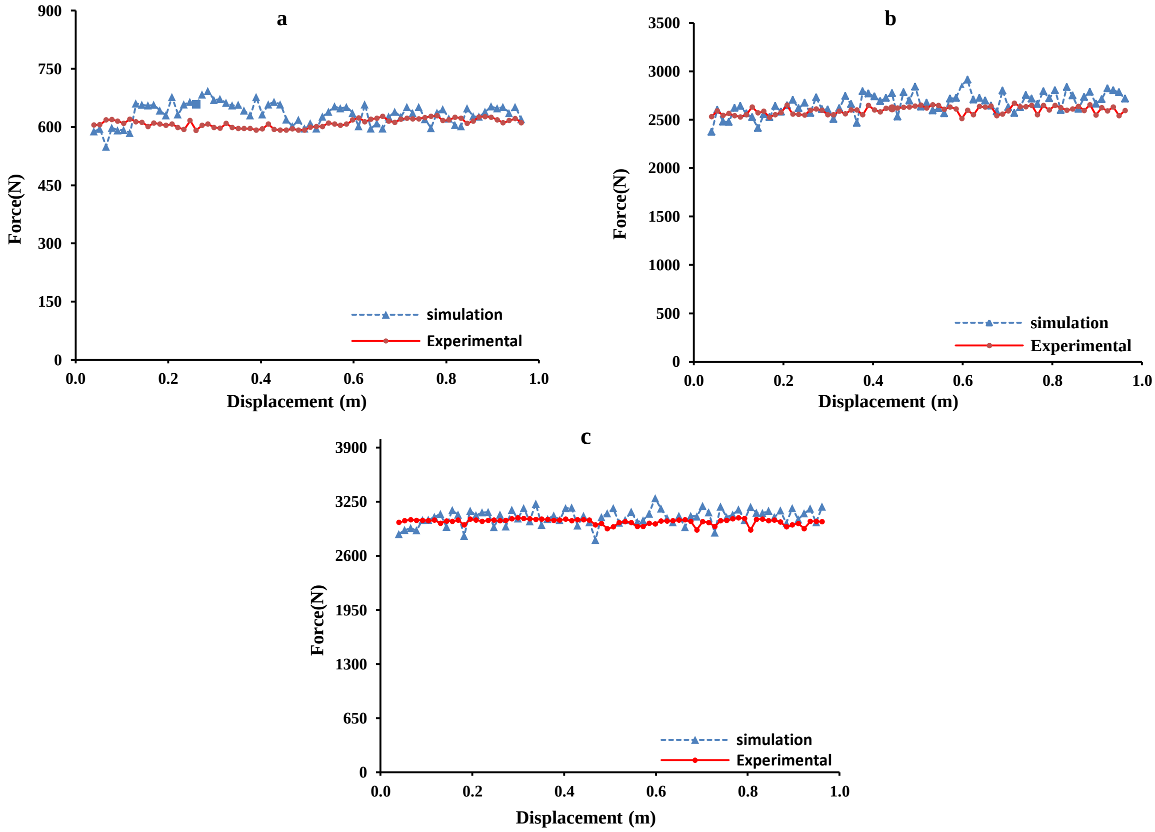
نتایج و بحث

فرایند این مطالعه شامل آزمون‌های تجربی و تعیین نیروی کشش پنجه‌غازی در سه سطح عمق کاری است و همه آزمون‌ها در سطح سرعت ۲/۵ کیلومتر بر ساعت انجام گردید. سپس شبیه‌سازی‌های اجزای محدود در تمام شرایط فوق در نرم‌افزار آباکوس انجام شد. در این بخش، ابتدا به نتایج مربوط به‌اندازه نیروی کششی مورد نیاز تیغه در شبیه‌سازی و سپس مقایسه با آزمون تجربی پرداخته می‌شود. در ادامه نتایج، در مورد اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی با استفاده از نتایج تجربی، بررسی کانتورهای توزیع تنش در خاک و درنهایت با توجه به مدل‌سازی هم‌زمان دو تیغه مجاور که امکان بررسی همپوشانی اثر تیغه‌های مجاور را فراهم کرده است، بحث می‌گردد.



شکل ٤- نتایج شبیه‌سازی به‌صورت نمودار نیرو-جابه‌جایی در عمق‌های تعریفی شبیه‌سازی : a) عمق ۶ سانتی‌متر، b) عمق ۱۰ سانتی‌متر و c) عمق ۱۴ سانتی‌متر

Fig. 4. Simulation results in the form of force- displacement diagrams at the defined depths of the simulation: a) 6 cm, b) 10 cm and c) 14 cm



شکل ۵– اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و تجربی نیرو-جابه‌جایی در راستای حرکت تیغه در عمق‌های: a) عمق ۶ سانتی‌متر، b) عمق ۱۰ سانتی‌متر و c) عمق ۱۴ سانتی‌متر

Fig. 5. Validation of simulation and experimental results of force- displacement in the direction of tine movement at depths: a) 6 cm, b) 10 cm and c) 14 cm

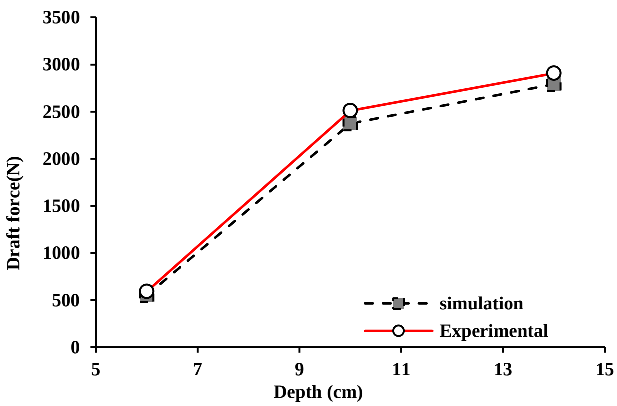
اندازه نیروی کششی هر تیغه بر اساس نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود برای سه عمق کاری ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر در سه راستای متعامد شامل راستای حرکت تیغه، امتداد عمود بر زمین و راستای عرضی در شکل ۴ ارائه‌شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقدار نیروی کششی با افزایش عمق تیغه، روند افزایشی به خود گرفته است که به دلیل افزایش عمق تیغه و درگیری بیشتر تیغه با حجم خاک بیشتر است. در همین راستا کمترین و بیشترین مقدار نیروی کششی در عمق ۶ و ۱۴ سانتی‌متر ایجادشده است.

به‌منظور قابل‌اعتماد بودن شبیه‌سازی‌های المان محدود، اعتبارسنجی این نتایج در مقایسه با نتایج تجربی در پیش گرفته شد. با توجه به این‌که در آزمون‌های تجربی صرفاً نیروی کشش در راستای حرکت تیغه اندازه‌گیری گردید، مقایسه نتایج شبیه‌سازی برای نیروی کششی در راستای حرکت به انجام رسیده است. در یک نگرش کلی، نیروی کشش تیغه با آغاز حرکت تیغه، شروع به افزایش داشته و در یک سطح نسبتاً یکنواخت، تثبیت‌شده است که این روند با شرایط واقعی حرکت تیغه از حالت سکون و افزایش تدریجی نیروی کششی از یک همخوانی منطقی برخوردار است. شکل ۵ نتایج تطبیق شبیه‌سازی و تجربی را به‌صورت هم‌زمان نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج شبیه‌سازی و تجربی نشان داد که انطباق نسبتا مناسبی بین آن‌ها برقرار است. محدوده خطای شبیه‌سازی سه عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر نسبت به آزمون‌های تجربی به‌ترتیب ۷/۳، ۵/۶ و ۴/۱۶ درصد مشاهده شده است. در مقایسه نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های انباره خاک برای تیغه‌های چیزل، در پژوهشی دیگر بهترین شرایط محدوده خطا را ۱۲-۴ درصد برای سرعت‌های پیشروی ۲/۴-۰/۵ متر بر ثانیه گزارش کرده‌اند (Tamás, Jóri, & Mouazen, 2013). نیروی کشش در شروع حرکت تیغه صفر است و با رسیدن سرعت تیغه به سطح تعیین شده، تقریبا تثبیت شده و در دامنه محدودی قرار می‌گیرد. بر اساس مشاهدات، تغییرات مولفه نیروی وارده بر تیغه در راستای عمود، در عمق‌های بیشتر، مقدار چندانی ندارد و از ثبات بیشتری نیز برخوردار است. در عمق ۶ سانتی‌متر، این نیرو به طرف پایین ظاهر شده است که به نظر می‌رسد به خاطر نرم بودن خاک سطحی، واکنش بین خاک و ابزار، بیشتر

متاثر از وزن خاک است. این در حالی است که در عمق‌های بالاتر در راستای عمودی، بین نیروهای به بالا و به پایین، تعادل نسبی برقرار شده است. این توجیه در برخی مطالعات برهم‌کنش خاک و تیغه نیز مشابه نتایج پژوهش حاضر گزارش شده است (Kešner *et al.*, 2021; Tamás *et al.*, 2013).

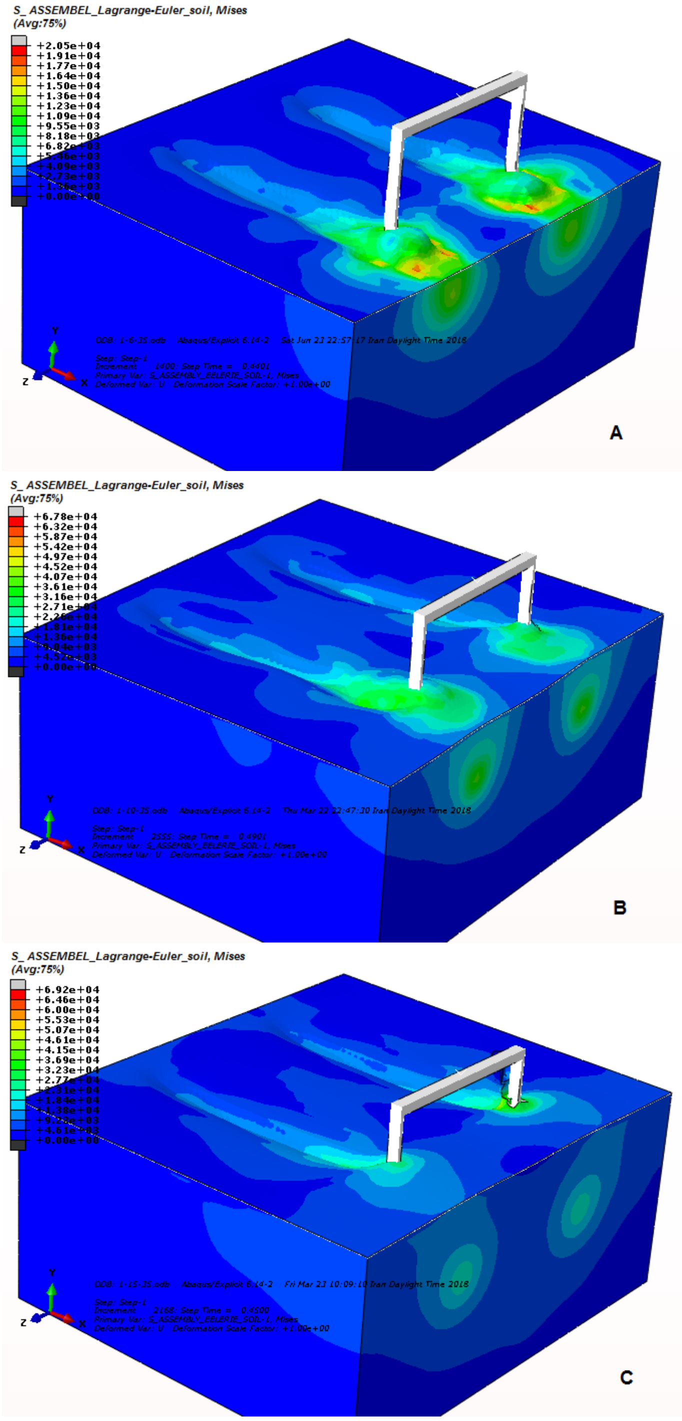
شکل ۶ مقایسه نتایج نیروی کشش برحسب عمق تیغه در شرایط شبیه‌سازی و آزمون‌های انباره خاک را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی، نتایج، از تطابق نسبتا خوبی با مشاهدات تجربی برخوردار بودند. البته به‌صورت جزئی در عمق 14 cm تطابق کمتری نسبت به بقیه عمق‌ها دیده‌شده است. به نظر می‌رسد که در شرایط تجربی با حضور عواملی مانند اینرسی خاک و ملاحظات دینامیکی که در شبیه‌سازی لحاظ نشده‌اند، شرایط دشوارتری برای حرکت تیغه در خاک برقرار بوده و از این‌رو، مقدار نیروی پیش‌بینی شده، کمتر از حالت واقعی است. این تفاوت در عمق‌های بیشتر، قابل ملاحظه‌تر است که البته با توجه به پیچیدگی فرایند مورد مطالعه، تفاوت بین شبیه‌سازی و نتایج تجربی، کمتر از ۵ درصد و نسبتا قابل قبول به نظر می‌رسد. مطالعات مشابه، اختلافی در حدود ۱۵ درصد را نیز به‌عنوان نتایج قابل ارائه گزارش کرده‌اند (Shmulevich *et al.*, 2007). از طرفی، نتایج حاکی از آن است با افزایش عمق، مقدار نیروی کشش دارای یک روند افزایشی است و همچنین افزایش نیروی کشش تیغه از عمق 10cm به عمق 14 cm چندان زیاد نیست که البته این نقطه نظر، در روند کلی ارائه‌شده در منابع دیگر نیز به‌صورت مشابهی گزارش‌شده است (McKyes, 1985; Mouazen & Neményi , 1999). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده و با احتساب سرعت پیشروی، توان لازم برای کشیده شدن هر تیغه در عمق کاری ۶ تا ۱۴ سانتی‌متر در محدوده ۲/۵–۰/۵ کیلووات است.



شکل ٦– تغییرات نیروی کشش در ارتباط با عمق تیغه در شرایط شبیه‌سازی و آزمون‌های انباره خاک

Fig. 6. Traction force changes in relation to tine depth in simulation and soil bin tests

در کنار نتایج مربوط به نیروی کشش تیغه‌ها در اثنای شبیه‌سازی، بررسی نتایج تنش و تغییر شکل در خاک نیز به‌عنوان خروجی‌های دیگر این مطالعه موردبررسی قرار گرفت. شکل ۷ وضعیت پوش‌های تنش را در سه عمق نشان می‌دهد. بررسی اولیه گسترش تنش در خاک حاکی از آن است که با افزایش عمق تیغه در سه سطح عمق موردبررسی، گستره تنش از سطح خاک به عمق آن جابه‌جا شده است. بدین منظور، در حداکثر عمق موردمطالعه در این پژوهش (14 cm)، تنش در خاک به وضعیت عمق بحرانی تیغه نزدیک شده و شدت انتشار تنش به سطح خاک، کمتر از عمق‌های دیگر است. میزان تنش خاک سطحی با کاهش عمق یعنی عمق 6 cm کاهش‌یافته، به‌طوری‌که بیشترین تنش در سطح خاک دیده می‌شود و به بیان دیگر، تغییر شکل بیشتری در سطح خاک پدیدار شده است. راستاهای x، y و z به‌ترتیب راستای حرکت تیغه، راستای عمود بر سطح خاک و راستای عمود بر مسیر حرکت تیغه است. تنش بیشینه به‌وجود آمده در خاک در سه عمق ۶، ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر به‌ترتیب در حدود ۲۰، ۶۸ و ۶۹ کیلوپاسکال مشاهده شده است. افزایش چشمگیر تنش در عمق‌های ۱۰ و ۱۴ سانتی‌متر نسبت به عمق ۶ سانتی‌متر در حالی دیده می‌شود که این دو سطح از عمق کار، تفاوت اندکی را از نظر تنش ایجاد شده با یکدیگر داشته‌اند. به عبارتی، با افزایش عمق کار از ۱۰ به ۱۴ سانتی‌متر با وجود افزایش بدیهی نیروی کششی تیغه، تفاوت چندانی از نظر افزایش تنش در خاک دیده نمی‌شود که به نوبه خود، تاییدی بر توصیه به‌کارگیری پنجه‌غازی‌ها در عمق‌های کاری پایین است. همچنین پوش‌های تنش در عمق ۶ سانتی‌متر تا سطح خاک گسترده شده است و حاکی از گسیختگی سطح خاک است در حالی که در عمق‌های بیشتر و به‌ویژه در عمق ۱۴ سانتی‌متر، پوش‌های تنش در زیر سطح خاک محبوس شده است و به نظر می‌رسد با احتمال ایجاد تراکم در لایه‌های زیرین، هدف ایجاد تخلخل و گسست خاک را با چالش همراه کرده است.

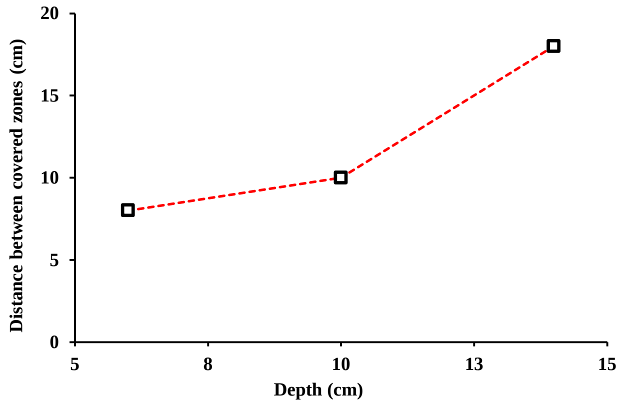


شکل ۷– نتایج شبیه‌سازی به‌صورت پوش‌های تنش در عمق‌های تعریفی شبیه‌سازی: A) عمق ۶ سانتی‌متر، B) عمق ۱۰ سانتی‌متر و C) عمق ۱۴ سانتی‌متر

Fig. 7. Simulation results of stress contours at the defined depths of the tine: A) 6 cm, B) 10 cm and C) 14 cm

با توجه به فلسفه کاربردی کولتیواتورها، این موضوع نشان از آن دارد عملکرد بهتر تیغه‌های کولتیواتور، بیشتر در عمق‌های کم قابل‌دسترس است. بررسی ابعادی مربوط به هموشانی تنش در فضای بین دو تیغه مجاور در قالب نمودار در شکل ۸ ارائه‌شده است.

بر اساس نتایج حاصله با افزایش عمق تیغه، ناحیه همپوشانی به‌هم‌خوردگی خاک کاهش یافته و نشان می‌دهد که اگر هدف از عملیات خاک‌ورزی، پوشش کامل سطح خاک باشد، عمق‌های بیشتر از ۱۰cm با ایجاد فاصله بیشتر بین ناحیه اثر دو تیغه، گزینه مناسبی نخواهد بود که البته در این میان باید فاصله تیغه‌ها را نیز در نظر داشت.



شکل ۸– فاصله بین ناحیه تحت تاثیر تیغه‌های مجاور در عمق‌های مختلف

Fig.8. Distance between covered zones of tines in different depths

نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت مقدار نیروی کشش تیغه‌های درگیر با خاک در کنار عملکرد آن‌ها و همچنین امکان تکیه کردن بر شبیه‌سازی اندرکنش خاک–ابزار، مطالعه حاضر در دو بخش تجربی و شبیه‌سازی به انجام رسیده است. مقایسه تطبیق نتایج شبیه‌سازی برای پیش‌بینی نیروی کششی با نتایج آزمون‌های تجربی منجر به نتایج مطلوبی گردیده است و حداکثر خطای پیش‌بینی نیروی کششی در عمق‌های مختلف ۷/۳ درصد بوده است. انتشار تنش در خاک براثر تردد تیغه بر اساس عمق کار مشاهده گردید. بیشترین شدت گسترش تنش در سطح خاک و همچنین بیشترین تغییر شکل سطحی خاک در عمق ۶cm مشاهده گردید و با افزایش عمق، هر دو پارامتر تنش و تغییر شکل سطحی خاک کاهش یافت که از این‌جهت به نظر می‌رسد به‌کارگیری تیغه‌هایی مشابه تیغه‌های موردمطالعه، بهتر است تنها در عمق‌های کمتر مدنظر قرار گیرد. ارزیابی همپوشانی ناحیه به‌هم‌خوردگی خاک در تیغه‌های مجاور نیز، برتری عملکرد تیغه‌ها در عمق‌های کمتر را گواهی می‌نماید.

References

1. Asaf, Z., Rubinstein, D., & Shmulevich, I. (2007). Determination of discrete element model parameters required for soil tillage. *Soil and Tillage Research*, *92*(1-2): 227-242. https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.006
2. Azimi-Nejadian, H., Karparvarfard, S. H., Naderi-Boldaji, M., & Rahmanian-Koushkaki, H. (2019). Combined finite element and statistical models for predicting force components on a cylindrical mouldboard plough. *Biosystems Engineering*, *186*, 168-181. https://doi.org/10.1016/j.Biosystemseng.2019.07.007
3. Birkás, M. (2009). Classic cultivation requirements and the need of reducing climatic damage. *Növénytermelés*, *58*(2): 123-134. https://doi.org/10.1556/novenyterm.58.2009.2.8
4. Busari, M. A., Kukal, S. S., Kaur, A., Bhatt, R., & Dulazi, A. A. (2015). Conservation tillage impacts on soil, crop and the environment. *International Soil and Water Conservation Research*, *3*(2), 119-129. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.05.002
5. Godwin, R. J., & Spoor, G. 1977. Soil failure with narrow tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*, *22*(3), 213-228. https://doi.org/10.1016/0021-8634(77)90044-0
6. Ibrahmi, A., Bentaher, H., Hamza, E., Maalej, A., & Mouazen, A. M. (2015). Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 2. Experimental validation with soil bin test. *Computers and Electronics in Agriculture*, *117*, 268-275. https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.08.004
7. Kešner, A., Chotěborský, R., Linda, M., Hromasová, M., Katinas, E., & Sutanto, H. (2021). Stress distribution on a soil tillage machine frame segment with a chisel shank simulated using discrete element and finite element

methods and validate by experiment. *Biosystems Engineering*, *209*, 125-138. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.06.012

8. Kushwaha, R. L., & Shen, J. (1995). Finite element analysis of the dynamic interaction between soil and tillage tool. *Transactions of the ASAE*, *38*(5), 1315-1319. https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=27953
9. Kushwaha, R. L., & Zhang, Z. X. (1998). Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review. *Journal of Terramechanics*, *35*(2), 69-86. https://doi.org/10.1016/S0022-4898(98)00013-5
10. Liu, Z., Liu, K., Ma, Z., Ni, F., & Gu, L. (2021). Mechanical responses and fracture mechanism of rock with different free surfaces under the chisel pick cutting. *Engineering Fracture Mechanics*, *247*, 1-16.
11. Mardani, A., Shahidi, K., & Karim-Maslak, H. (2010). An indoor traction measurement system to facilitate research on agricultural tires. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, *8*(2), 642-646.
12. McKyes, E. (Ed.). (1985). *Soil cutting and tillage*. Elsevier. p 216.
13. Mouazen, A. M., & Neményi, M. (1999). Finite element analysis of subsoiler cutting in non-homogeneous sandy loam soil. *Soil and Tillage Research*, *51*(1-2), 1-15. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00015-X
14. Sadeghnejad, H., & Islami, K. (2006). Comparison of wheat yield by changing the tillage method. *Agricultural Sciences*, *12*(1), 103-112. (in Persian).
15. Shao, Y., Xie, Y., Wang, C., Yue, J., Yao, Y., Li, X., ... & Guo, T. (2016). Effects of different soil conservation tillage approaches on soil nutrients, water use and wheat-maize yield in rainfed dry-land regions of North China. *European Journal of Agronomy*, *81*, 37-45. https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.08.014
16. Shmulevich, I., Asaf, Z., & Rubinstein, D. (2007). Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil and Tillage Research*, *97*(1), 37-50. https://doi.org/10.1016/j.still.2007.08.009
17. Smatana, J., Macák, M., & Demjanová, E. (2010). The influence of different tillage practices on soil physical characteristics. *Research Journal of Agricultural Science*, *42*(3), 315-319.
18. Tamás, K., Jóri, I. J., & Mouazen, A. M. (2013). Modelling soil–sweep interaction with discrete element method. *Soil and Tillage Research*, *134*, 223-231. https://doi.org/10.1016/j.still.2013.09.001
19. Ucgul, M., & Saunders, C. (2020). Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling. *Biosystems Engineering*, *190*, 58-70. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2019.11.022
20. Várallyay, G. (2010). The role of soil resilience in sustainable development. *Növénytermelés*, *59* (Supplement): 173-176.